

# 起振機試験による基礎構造の振動特性

—(その1) 非弾性的な性質について—

小堀 鐸二・南井良一郎・鈴木 有・日下部 馨

## DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SOIL-FOUNDATION SYSTEMS DETECTED FROM OSCILLATOR TESTS

—PART 1 NONELASTIC DYNAMIC CHARACTERISTICS—

By *Takuji* KOBORI, *Ryoichiro* MINAI, *Tamotsu* SUZUKI and *Kaoru* KUSAKABE

### Synopsis

The vertical and horizontal harmonic excitation tests are carried out for the two reinforced concrete foundations having similar configuration and distinct dimensions by making use of rotating mass type oscillators. The foundations are constructed on the surface of the typical soft ground in Osaka area. The velocity responses of the foundations and the static and dynamic earth pressure distributions produced underneath their bottom surface are measured through seismometers and earth pressure gauges, respectively. The nonelastic and rheological aspects of the dynamic characteristics of soil-foundation systems are detected for various excitation levels, foundation dimensions and exciting directions. Finally, the experimental results are compared with the computed responses derived from the viscoelastic wave propagation theory and some attempts are made to correct the theory.

### 1. ま え が き

本研究の目的は、所謂軟弱な地盤に固有の動特性と地盤・基礎構造の動的相互作用の性質を明らかにすることとあり、現実の地盤に設置された基礎構造模型の振動実験と実験敷地の地盤調査に基づいて、このような諸性質を検出するとともにその機構を明らかにし、構造物—地盤連成系の地震応答解析にさいして地盤モデルを構成するための基礎資料の集積をめざすものである。大阪地方の典型的な軟弱地盤を対象に選び、その地表面に大きさの異なる鉄筋コンクリート製の基礎構造模型を設置し、起振機を用いて上下および水平方向の強制加振実験を行ない、基礎自身の応答、地表面の応答分布および基礎と地盤との接触面に生じる土圧応答の分布を計測した。本実験は、同じ敷地において既に実施した一連の実験的研究の一環をなすもので、もとの地表面に基礎を設置した前回までの実験とは異なり、表層の盛土部分を相当広い面積にわたって掘削し、その下の軟弱な地層を露出させ、その性質を実験的に直接検出しようとするところに今回の実験の特徴がある。また実験を通じて、構造物に被害を生じるような地震のさいに問題となる応答レベルの大きい時の地盤の動特性に関して、非弾性的なあるいはレオロジカルな諸性質を基礎の振動特性の面から明らかにすること、および隣接する基礎構造の影響を加振方向や基礎間隔を変えながら明らかにすることに主眼をおき、それぞれ結果を(その1)と(その2)にまとめた。

本報(その1)には、前者の目的のために実施した振動実験の概要を第2節に、得られた計測結果を第3節に、そして前回までの一連の実験結果をもふまえてその分析結果を第4節にまとめた。さらに、敷地付近で得られている地盤調査の結果を利用して、地層構成と地盤常数を推定し、粘弾性波動論から導かれた Dynamical Ground Compliance の理論に基づいて、実験結果の理論面からの検討を部分的に行ない、その分析結果を第5

節に示した。その目的とするところは、実験結果を概括的にどの程度説明しうるかというこの理論の妥当性と適用限界を明らかにするとともに、直接的な理論の適用に限界がある場合について、弾性論の範囲内で等価な理論の修正を試みることにある。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験の期間

本実験は昭和48年5月から同年8月まで大阪市内において行なわれた。今回の実験は、昭和46年11月から12月にかけて同一敷地において実施した起振機による基礎構造模型の予備的な加振実験<sup>1)2)</sup>に引続く一連の実験的研究の一環である。

### 2.2 実験の敷地

実験を行なった敷地は大阪市城東区森町の大阪市交通局森之宮営業所跡の一部である。敷地の配置図を Fig. 1 に示した。図に示すように、東西・南北 60 m×60 m の面積を深さ約 2 m まで掘削し、レンガやコンクリート片等を含んだ深さ約 1.5 m の表層の盛土部分を除去した。盛土の下に位置する軟弱な地層を露出させ、その上に基礎構造模型を設置して軟弱地盤の影響を直接的に計測しようとするためである。掘削の面積は根伐りのために段差を生じる周辺の地形が基礎の応答に影響を与えないようにとの配慮からその大きさが定められた。

掘削された敷地内での地盤調査はまだ完了していないが、敷地南端中央より約 10 m 南側 (Fig. 1 の×印) で得られている地盤調査の結果から地層構成と地盤常数を示すと Fig. 2 のようになる。これによれば、深さ 4 m と 7 m 付近に 1 m 程度の薄い砂質土の層があるのを除くと、深さ 21 m 付近まで  $N$  値 5 以下の粘土またはシルト質の層が大部分を占める。そして、その下にやや硬い砂または砂礫層が現われ、それ以深は粘土・シルト層と砂・砂礫層が互層になるという大阪地方の典型的な軟弱地盤の性質を持っている。

### 2.3 基礎構造模型

実験には大小 3 個の鉄筋コンクリート製の基礎構造模型を用い Fig. 1 のように配置した。それぞれ F1 (寸法 W4m×D4m×H0.7m), F2 および F3 (ともに寸法 2m×2m×0.35m) なる名称を付している。F1 および F2 基礎は敷地の地表面に設置・固定した加振基礎で、その上に起振機を設置し、上下方向および水平 2 方向の各加振実験に使用した。敷地の全景と F1 および F2 基礎を Photo. 1~3 に示した。なお F3 基礎は隣接基礎の影響を調べるための移動用の受振基礎で、詳細は (その 2) において述べる。また F1 および F2 基礎の底面には、基礎と土との接触面に生じる静圧および動圧分布を測定し両者の接触状態をモニターするために、それぞれ 5 個および 3 個の土圧計を埋設した。

F1 および F2 基礎の打設方法は次のとおりである。掘削された実験敷地の地表面は比較的硬い粘土層であるが、基礎を設置する部分をできるだけ原地盤を乱さないように平らに鋤き、予め土圧計を装着したモルタル製の土圧計ブロック (寸法 20cm×20cm×6cm) を設置し、基礎底面全体にわたって厚さ約 5 cm の捨コンクリートを打ってこれを固定したのち、配筋を行ない所定の寸法に仕上げた。なお土圧計ブロックの設置面には、受圧板に圧力が均等にかかるよう厚さ約 1 cm の均質な川砂を敷いた。

### 2.4 計測器および起振機

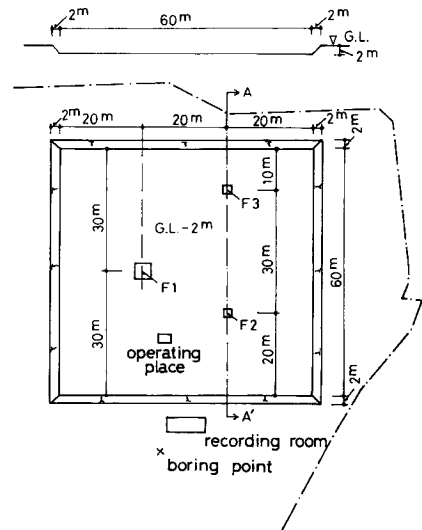


Fig. 1 Site of the experiment.

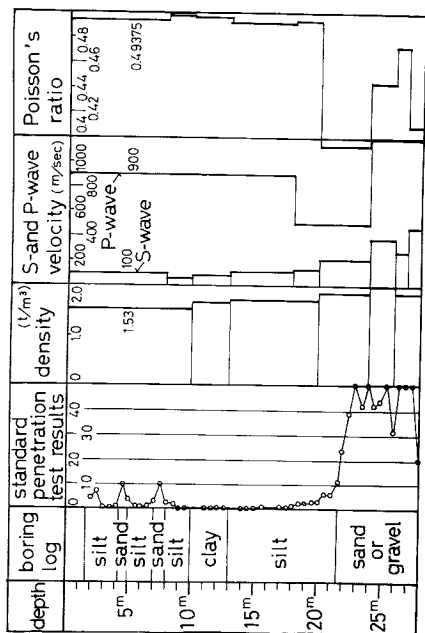


Fig. 2 Geological section and velocity profiles of the site.

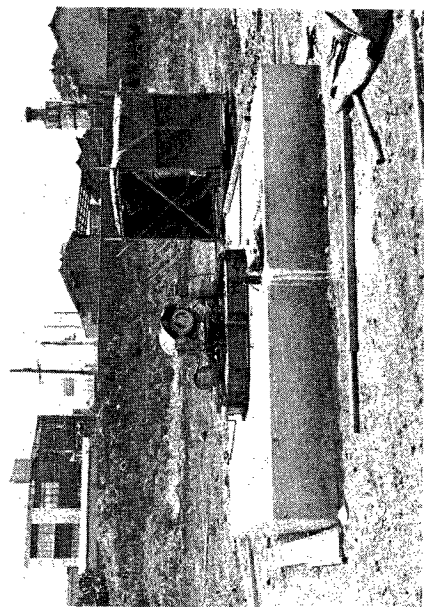


Photo. 2 F1-foundation.

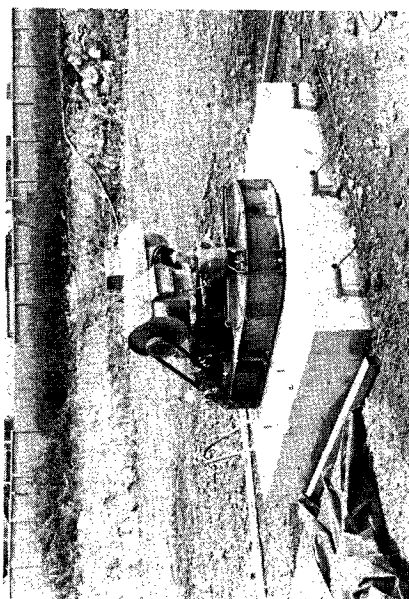


Photo. 3 F2-foundation.

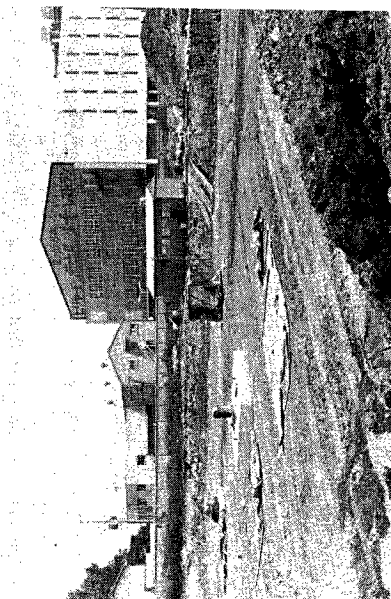


Photo. 1 View of the experimental site.

Table 1 Specifications of seismometer and earth pressure gauge.

| 地 震 計  | 土 圧 計  |
|--|--|
| 東京振動研究所製 TMT-3<br>動電式速度型換振器<br>(水平2成分・上下1成分内蔵)<br>固有周期; 3Hz<br>感 度; 30 mV/kine | 共和電業製 BE-2KB<br>ひずみゲージ式土圧計<br>受圧板径; 90 mmφ<br>容 量; 2 kg/cm <sup>2</sup><br>感 度; 0.002kg/cm <sup>2</sup> /1μV/V |

加振実験においては、基礎の上面に取付けた地震計によって基礎自身の応答を、基礎底面に埋設した土圧計によって基礎下に生じる静および動土圧分布を計測した。使用した地震計および土圧計の主要性能を **Table 1** に示した。地震計および土圧計の出力はそれぞれ直流増巾器と動歪測定器によって増巾され、ローパス・フィルターで機械的・電氣的な高周波の雑音成分を汙波したのち、ペンレコーダーに応答波形を記録した。地震計のキャリブレーションの結果は接続する計測器によって異なることが多いので、ここでは現場で使用した計測システムと同一のものに対して検定用の振動台によるキャリブレーションを行なった。結果の一部(その2)において示している。土圧計に対しては動的なキャリブレーションの実施が既知の入力源を得る点で困難なので、単体として静的に得られている感度を準用した。

基礎に正弦波の加振力を作用させる起振機には実験の目的に応じて3種のを併用した。それぞれA(垂直・水平両用)、B(水平専用)、C(垂直・水平両用)、なる名称を付し、その性能と仕様を **Table 2** に示した。3種の起振機とも不平衡錘反転方式であり、回転中にその偏心モーメントの設定値を変更できないので、基礎に作用する加振力は加振振動数の2乗に比例する。

Table 2 Specifications of the three types of oscillator.

| 記 号               | A                                      | B                                 | C  |
|-------------------|--|-----------------------------------|--|
| 型 番               | 伊藤精機製<br>EX-400DL                      | 伊藤精機製<br>EX-3000                  | 伊藤精機製<br>EX-1000DC                                 |
| 加 振 方 式           | 直列配置<br>3軸不平衡重錘反転式                     | 並列配置<br>垂直2軸不平衡重錘反転式              | 水平4軸<br>不平衡重錘同期反転式                                 |
| 加 振 方 向           | 垂直および水平<br>(360°回転自在)                  | 水平のみ<br>(一方固定)                    | 垂直および水平<br>(360°回転自在)                              |
| 最大加振力             | 4000kg<br>(15.8 Hz 以上)                 | 2000kg<br>(4.1 Hz 以上)             | 4000kg<br>(10.0 Hz 以上)                             |
| 加振力波形             | 正弦波                                    | 正弦波                               | 正弦波  |
| 偏心モーメント           | 0~400 kg·cm                            | 0~3000 kg·cm                      | 0~1000 kg·cm                                       |
| 本 体 重 量           | 約 1000 kg                              | 約 750 kg                          | 約 1300 kg  |
| 加 振 振 動 数         | {0.75~15 Hz<br>{1.5~30 Hz<br>Vベルト2段掛替え | {1~10 Hz<br>{2~20 Hz<br>Vベルト2段掛替え | {0.1~10 Hz<br>{0.2~20 Hz<br>{0.4~40 Hz<br>減速歯車の切替え |
| 水平加振時の<br>加振力作用高さ | 302 mm                                 | 136 mm                            | 300 mm   |

## 2.5 実験の方法

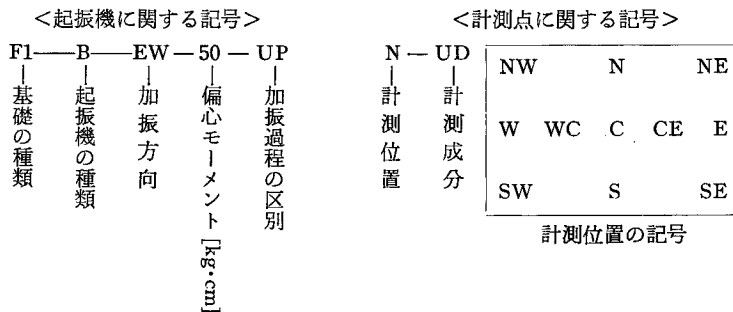
本実験における通常の加振および測定方法は次のとおりである。起振機の偏心モーメントを所定の値に設定

したのち、起振機を動作し加振振動数を漸増させる。計測に必要な振動数に達したとき、加振振動数と基礎の応答が安定して定常状態になるのを待って必要な応答計測を行なう。次いで、次の計測振動数まで加振振動数を上昇させ同様な加振および応答計測を繰返す。ここに、静止の状態から振動数を増加させて最大加振振動数に達するまで計測を続ける加振過程を“UP”と名付け、逆に同様な手順で最大加振振動数から振動数を減少させながら計測を続ける加振過程を“DOWN”と名付ける。計測振動数の間隔は0.5ないし1 Hzで、ひとつの計測振動数から次の振動数に移行するまでの時間および応答計測のために加振振動数を固定しておく時間はともに0.5~1分間である。最大加振振動数30 Hzに対してUP+DOWNの1ケースの所要時間はおよそ30~60分間である。なおF1およびF2基礎について、ともに上下、水平NSおよび水平EWの3方向の加振実験を3~4種類の偏心モーメント（以下の図ではE.M.と略す）の設定値に対して実施した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 結果の表示

結果の表示法は次のとおりである。ペンレコーダに記録された応答波形から応答振巾を読みとり、起振機の回転軸に取付けられたパルス発生機の出力あるいは応答波形そのものから加振振動数を読みとる。前述したように加振力は振動数の2乗に比例して変動するので加振振動数に対する単位加振力当りの速度応答振巾 [kine/ton] によって基礎の応答特性を表現する。これを“速度応答曲線”と呼ぶ。同様に加振振動数に対する単位加振力・単位面積当りの土圧応力の応答振巾 [kg/cm<sup>2</sup>/ton] によって、基礎下に生じる動的な変動土圧の応答特性を表現する。これを“土圧応答曲線”と呼ぶ。また以下に示す図中の記号は次に記すような意味を持っている。



#### 3.2 上下加振実験（F1基礎）

##### 1° 応答曲線の一般形

標準的なケースについて基礎の速度応答曲線の一般形を Fig. 3 に示した。応答曲線は連成系の固有振動の存在を意味するピークをもつ曲線となり、一般に基礎のE側にあつては唯一の明瞭なピークを、またW側にあつてはいくぶんならかな2つないしそれ以上のピークをもっている。この共振点の右側——高振動数側ではUPとDOWNの応答曲線がほぼ完全に一致するのに対して、その左側——低振動数側ではDOWNの応答はUPより常に大きく、曲線はこの2つの加振過程でヒステリシスを描く。したがって、連成系には under-linear (soft 型) の復元力をもつ非線形系の強制振動に現われる所謂 jump 現象のような特性を発生する機構が存在すると考えられる。基礎の寸法・自重とも大きく、基礎周辺の土への拘束圧力が大きく、かつ応答レベルが比較的小さいF1基礎の場合、このヒステリシスはさほど顕著ではない。また同じ加振条件のもとでは、水平より上下加振の場合にヒステリシスの現われ方が大きい。

##### 2° 加振力レベルの影響

偏心モーメントの設定値を変えたときの速度応答曲線を Fig. 4 に示した。偏心モーメントの増加すなわち

加振力の大きさ（あるいは基礎—地盤系の応答レベル）の増加にともない、唯一のピークが存在するE側においては、共振点の位置が低振数側に移行し、同時に単位加振力当りの共振振幅が漸増して、応答曲線が全体に左上方に移行するとともにピークの形がやや鋭くなる。2つないしそれ以上のピークが存在するW側でも、一般には上と同じ傾向が見られるが、必ずしも常に規則性をもって現われているのではない。さらに、応答曲線はその骨格曲線がやや左に傾くという性質をもっている。以上を要するに、地盤の動特性には underlinear な（あるいは soft 型の）非線形性を発生する機構が存在し、加振力のレベルいいかえると系の応答レベルが増加するにしたがい、この非弾性的な性質が顕著に現われるようになるのであろう。しかし、F1 基礎の場合、系の応答レベルが比較的小さいので、それほど強い非線形性は認められない。

### 3° 加振の繰返しによる影響

レベルの異なる各種加振の繰返しを行なう一連の実験のなかで、同一の実験条件の速度応答曲線を Fig. 5 に示した。これによれば、各種加振の繰返しの影響は比較的小さいので、応答特性には同一加振レベルに対する再現性がほぼ保持されていると判断して差支えなからう。F1 基礎の場合 1° に述べた理由によって連成系の応答レベルが非線形性の強い領域には入らないからであろう。

### 4° 基礎の振動モード

基礎上の異なった計測点に対する速度応答曲線の分布を Fig. 6 に示した。計測位置によって応答曲線の形状がかなり顕著に異なるのが特徴的である。N および S 点を通る中央軸を境にして応答曲線は E 側で唯一の明瞭なピークをもつものに対して、W 側では互に近接したやや緩やかな 2 つないしそれ以上の複数のピークを持ち、曲線はこれらピークの近傍で比較的平坦に近い。中央軸上の応答特性は E 側の性質に近いが、どちらかといえば E 側と W 側の中間的な性質をもっている。剛体として上下振動以外のモードとくに回転振動のモードが生起すること、また F1 基礎程度の寸法になると、局所的には版的な変形の振動モードが影響を与えること、などが原因として考えられる。実際には基礎—地盤連成系の非対称性と地盤反力の不均質性が存在するので、剛体的な上下振動のモードのみでは説明しきれないこのような性質が現われてきたのであろう。

### 5° 静土圧分布

変位系統の尺度による測定にくらべると、土圧応力の測定は設置の方法とともに技術的に難しい問題を内包しているので、測定結果に絶対的な信頼はおけないが、定性的な傾向の把握および基礎底面と地表面との接触状態のモニターを果す役割は可能であろう。

第 1 回の加振実験前後の静土圧力分布の計測結果を Fig. 7 に示した。静土圧の分布はやや E 側に片寄った放物線に近い形状をしている。基礎に接する表層は粘土質であるが、この分布形は実験室内の砂質土について

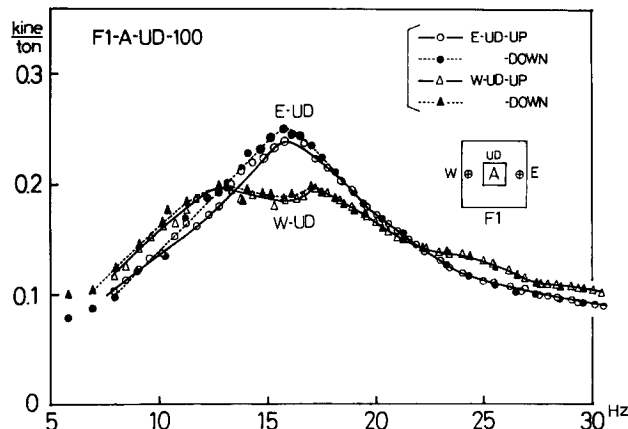


Fig. 3 Velocity response curves of F1-foundation for the case of vertical excitation.

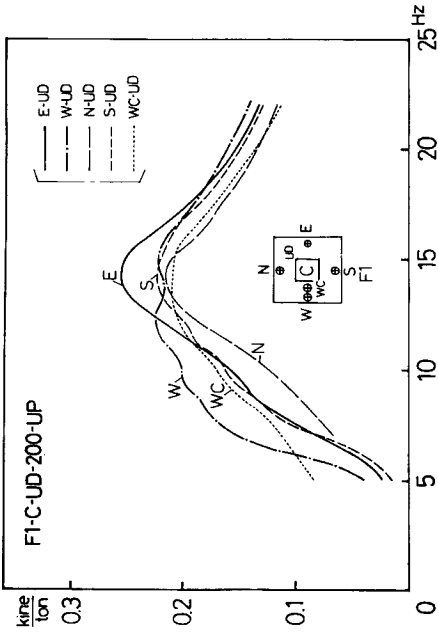


Fig. 6(a)

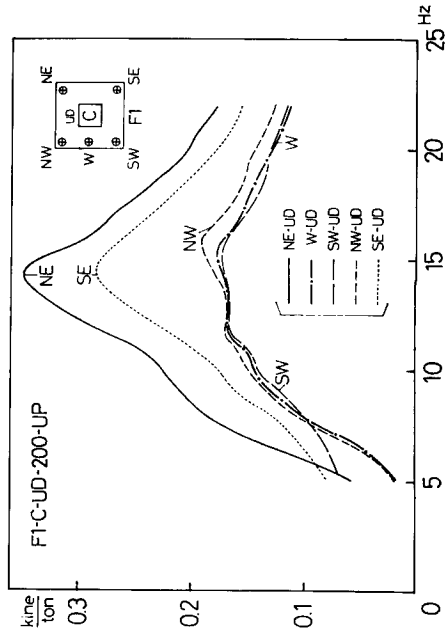


Fig. 6(b)

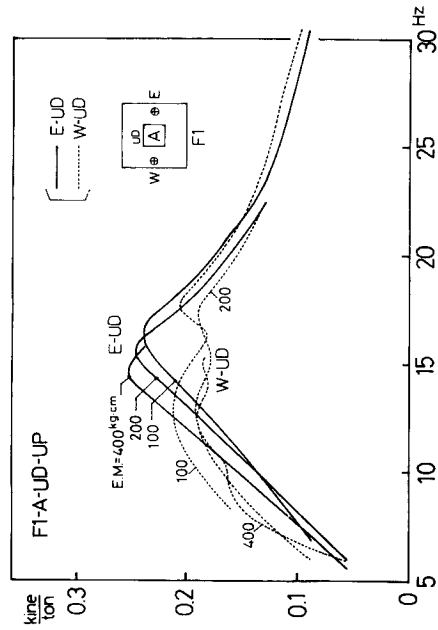


Fig. 4

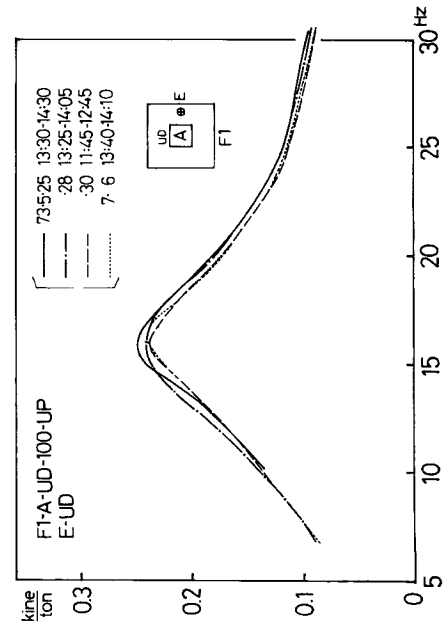


Fig. 5

Velocity response curves of F1-foundation for the case of vertical excitation.

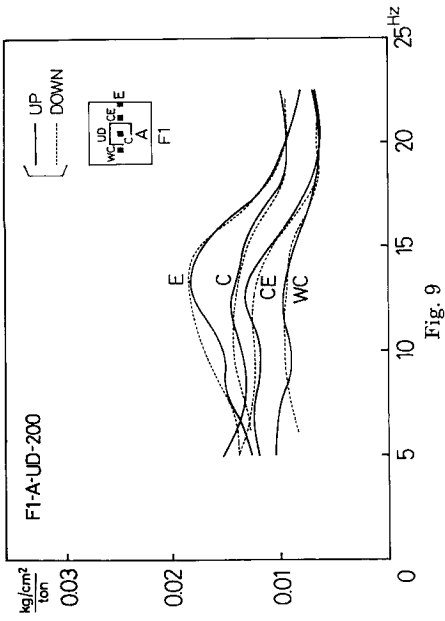


Fig. 9

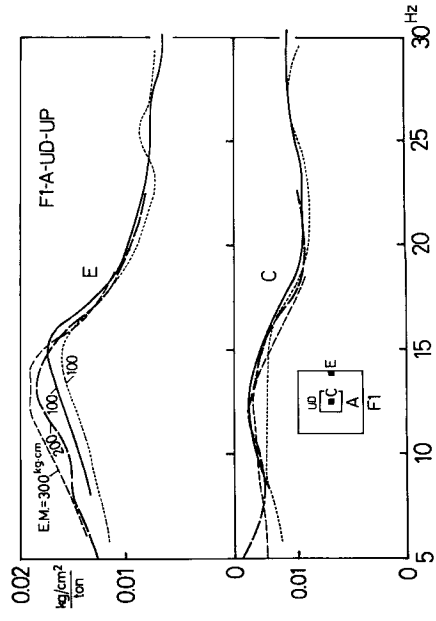


Fig. 10

Earth pressure response curves of F1-foundation for the case of vertical excitation.

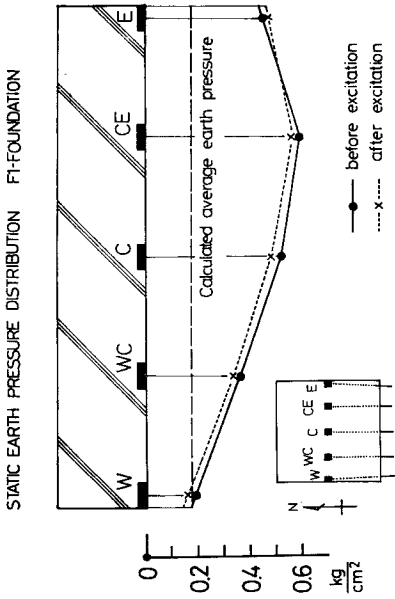


Fig. 7

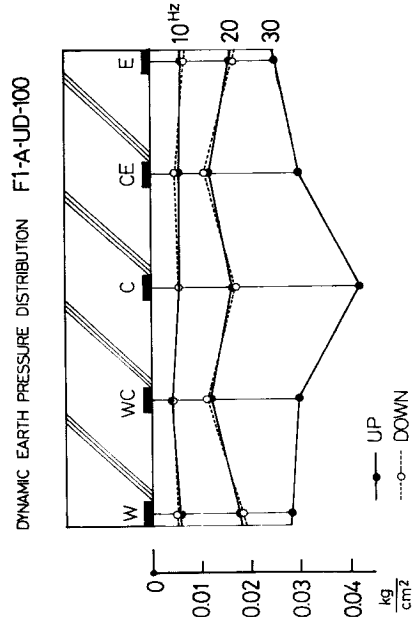


Fig. 8

Earth pressure distributions of F1-foundation for the case of vertical excitation.



従来得られている測定結果に近い。ところで、各点の土圧応力は基礎と起振機の自重から計算された平均応力をすべて超過している。土圧計ブロックの設置方法のなかに、あるいは基礎打設のコンクリートの硬化時に、受圧板と砂との接触状態を変えたり、土圧計ブロックに初期応力の集中を引起こすような作用が働いているのであろうか。

### 6° 動土圧分布

位置による相互の位相差を無視した動土圧振巾の分布形を Fig. 8 に示した。振動数によって分布形状が変動し、共振点の近傍で応答が中央部付近にやや集中する傾向にあるが、これより低振動数域あるいは高振動数域に入るにしたがい、ほぼ平坦に近い分布を示すようになる。

次に、土圧応答曲線の一般形を Fig. 9 に、また加振レベルの影響を Fig. 10 に示した。動土圧において UP-DOWN の応答曲線が描くヒステリシスは基礎の速度応答のときのような明確な規則性をもたず、また位置によってもその現われ方が異なる。土圧計と土との接触状態が直接的に結果に微妙な影響を与えるからであろう。加振力レベルが基礎の中央付近の土圧応答に及ぼす影響は比較的小さいが、端部に移るほど顕著に現われるようになる。その現われ方は基礎の速度応答の場合と同様で、加振力レベルの増加とともに共振振動数が低下し単位加振力当りの共振振巾が増加するという形をとる。土圧および速度応答曲線の全体的な形状は両者でやや異なる。すなわち、基礎底面に接触する土への拘束力の強い中央部では振動数による変動は少ないが、拘束力が弱い端部に近くなるほど速度応答曲線とよく似た形状をもつようになり、両者の共振振動数もほぼ一致する。また、各種加振のくり返し履歴の影響は、速度応答の場合と同様に比較的小さく、再現性がほぼ確保されているとみなしうる。

## 3.3 上下加振実験（F2 基礎）

### 1° 応答曲線の一般形

標準的なケースに対する速度応答曲線の一般形を Fig. 11 に示した。全般的な性質は F1 基礎の場合と変わらない。しかし、詳しく見ると、共振点より高振動数側の領域で、UP と DOWN の応答曲線が早くからヒステリシスを描くこと、UP-DOWN の応答曲線の大小関係が計測位置によって異なること、またそのヒステリシスが非常に顕著なこと（とくに S-UD 成分において）が目ざされる。F1 基礎に比べると基礎の寸法・自重とも小さいので、同じ加振力を作用させると、相対的な加振力のレベルがあるいは系の応答レベルがかなり大きくなる。さらに基礎に接する土への拘束応力も小さいので、以下の各項に述べる諸点をも含めて、地盤の動特性の非弾性的なあるいはレオロジカルな諸性質が、この F2 基礎の場合には F1 より相当顕著に現われているのが全体を通じての大きな特徴になっている。

### 2° 加振力レベルの影響

速度応答曲線の偏心モーメントによる変化を Fig. 12 に示した。F1 基礎の場合と共通の性質が現われているが、加振力レベルの上昇に伴う共振振動数の低下と単位加振力当りの応答振巾の増加が著しい。

### 3° 加振の繰返しによる影響

一連の実験のなかから同一の加振条件に対する速度応答曲線を Fig. 13 に示した。F2 基礎に比べてこの影響はかなり大きい。加振の繰返しとともに共振点が低振動数側に移行し、単位加振力当りの共振振巾が漸減するという傾向を伴って現われ、同一加振条件に対する再現性が失われる。このような傾向から判断して、加振の繰返しに伴う応答特性の変化は地盤復元力の劣化によって地盤の剛性が低下し、周辺地盤の非線形化の進行とともに減衰性能が増大するためと解釈できよう。

### 4° 地盤状態の影響

Fig. 12 において、実線で示したケースは表層地盤がやや乾燥状態にある場合、点線で示したのは強い降雨のあとで地盤が多量の水を含み、極めて軟弱な場合である。これら 2 つのグループを比較すると、地盤の軟弱な後者の方が共振振動数・単位加振力当りの共振振巾ともに小さい。含水量の増加に伴う地盤の軟弱化は、マクロな観点から捉えれば、地盤剛性の低下と減衰性能の増大を意味すると考えられ、3° に述べた加振の繰

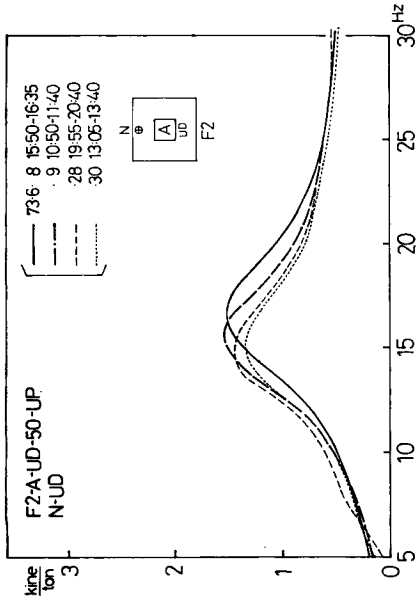


Fig. 11

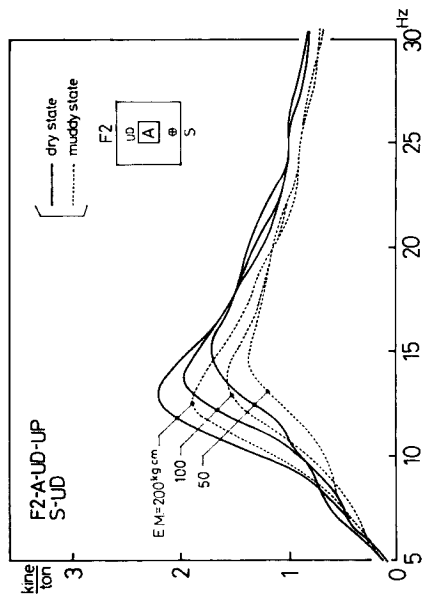


Fig. 12

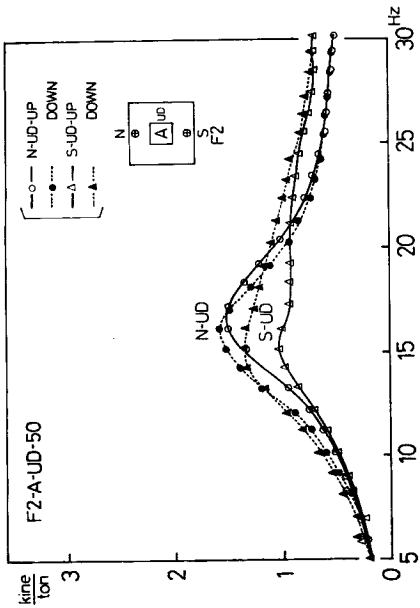


Fig. 13

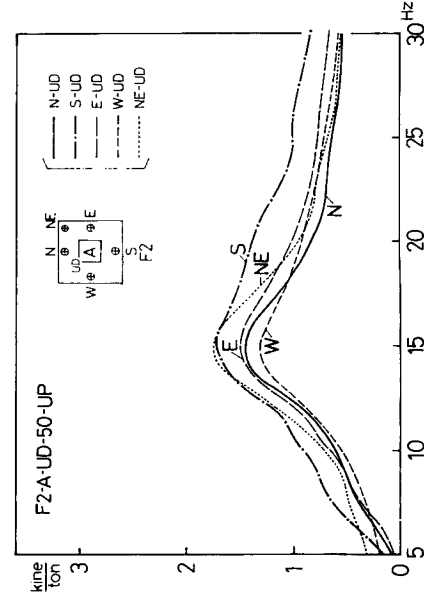


Fig. 14

Velocity response curves of F2-foundation for the case of vertical excitation.

返しによる影響と同様な地盤復元力の劣化として扱えられる。

5° 基礎の振動モード

基礎上のいくつかの位置で同時計測された速度応答曲線を Fig. 14 に示した。F1 基礎の場合とは異なり、応答曲線はすべて唯一の明瞭なピークをもち、曲線の定性的な性質は基礎上の位置によってほとんど変わらない。基礎は全体として剛体的な上下振動をしているとみなして差支えないが、各計測点での応答曲線を詳しくみれば、F1 基礎の場合について述べたと同様に、剛体的な上下振動のみでは必ずしも解釈しきれない部分が存在する。

6° 静土圧分布

測定された静土圧の分布と基礎と起振機の自重から計算された平均土圧応力を Fig. 15 に示した。測点は少ないが、分布形状および計算による平均土圧応力と測定値との相互関係は、ともに F1 基礎の場合と共通の性質を有している。

7° 動土圧分布

土圧応答曲線の一般形を Fig. 16 に、また加振レベルの影響を Fig. 17 に示した。全般的に F1 基礎の

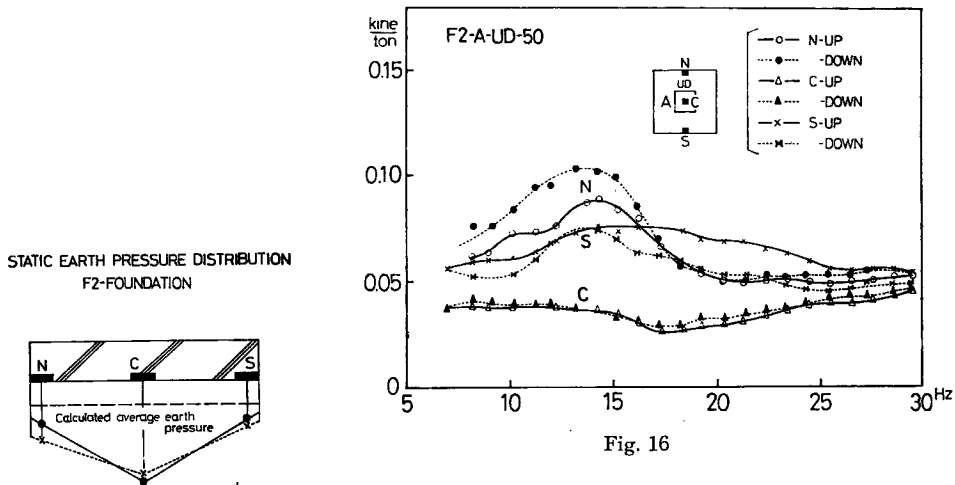


Fig. 15 Static earth pressure distributions of F2-foundation.

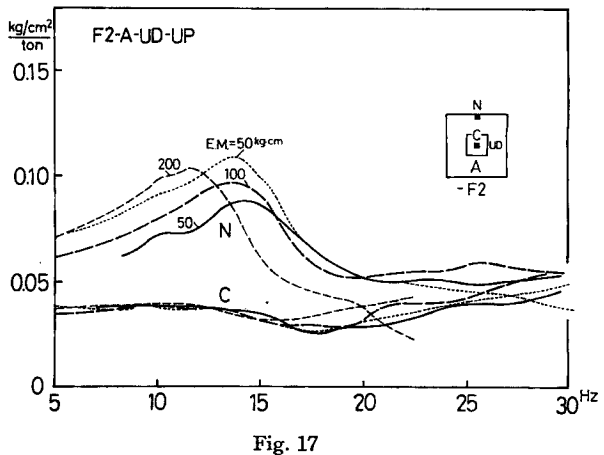


Fig. 17 Earth pressure response curves of F2-foundation for the case of vertical excitation.

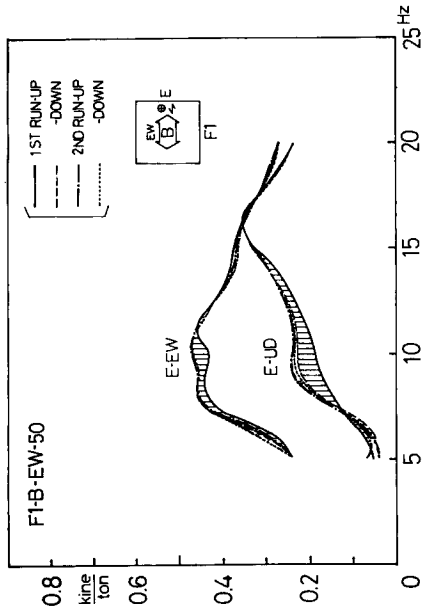


Fig. 20

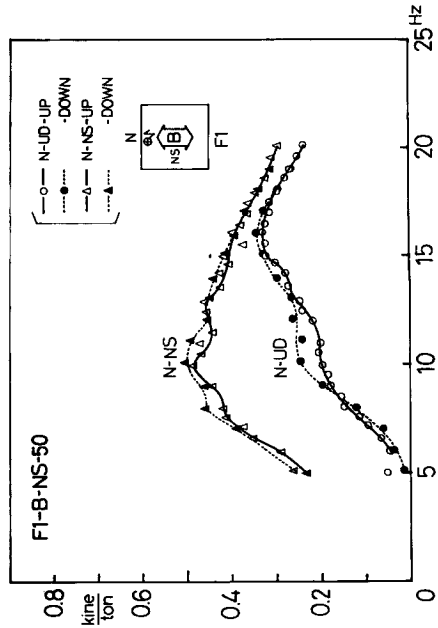


Fig. 21

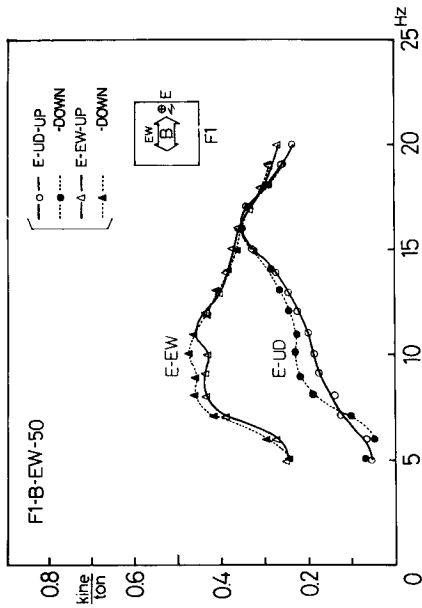


Fig. 18

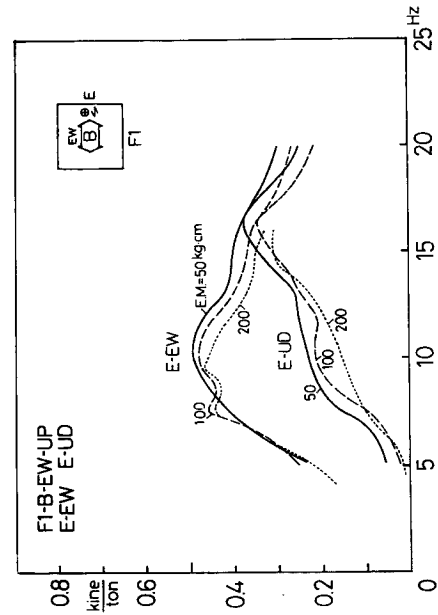


Fig. 19

Velocity response curves of F1-foundation for the case of horizontal excitation.

場合と共通の傾向が強調された形で現われている。基礎の中央部では UP と DOWN の差異も振動数による変動も少ないが、端部になると、応答レベルの上昇に伴って UP と DOWN 両者の差異が著しく拡大されるとともに、明瞭な共振のピークが現われてくる。土圧応答の場合、局所的な接触状態の変化が直接的に影響を与えるため、UP と DOWN の応答の大小関係には一般に規則性がみられない。加振力レベルの影響も F1 基礎の場合と共通で、中央部ではほとんど影響を受けないのに対して端部になるとその効果が強く現われ、同一加振条件に対する再現性も大きく失われる。また、加振振動数が異なると土圧振巾の空間的な分布性状が変動する様子も、F1 基礎の場合と同様である。

### 3.4 水平加振実験（F1 基礎）

#### 1° 応答曲線の一般形

水平 EW 加振に対する速度応答曲線の一般形を Fig. 18 に示した。応答曲線には、水平成分に現われているややなだらかな近接した2つのピークと、垂直成分に卓越した2つのピークという3つの共振点が存在する。複数個の共振点の存在は F1 基礎の応答曲線にみられる大きな特徴のひとつになっており、後にみるように、寸法の小さい F2 基礎には明瞭な唯一のピークが現われるだけである。したがって、この場合に複数個のピークが出現するのは、基礎寸法の増加に伴って、深い地層構造が基礎の振動特性に反映した結果であろう。あるいは、剛体としての水平並進一回転のロッキング振動のモードに、版的な変形のモードが付加された結果かもしれない。

UP と DOWN の応答曲線が描くヒステリシスは一般に小さく、とくに引続く2回目以降の加振過程では、ほぼ全域にわたって両者の応答曲線が一致する (Fig. 20 参照)。なお詳しくみると、共振点より低振動数側で DOWN の応答が UP より必ず大きいという、上下加振の結果にすべて共通した性質が、この場合にも一般には保持されているが、場合によってはその大小関係が逆転する場合もある。

#### 2° 加振力レベルの影響

水平 EW 加振の場合について、偏心モーメントの設定値による速度応答曲線の変化を Fig. 19 に示したが、これまでのようにきれいな規則性がみられない。この例では、加振力レベルの増加に伴う共振振動数の低下は認められるが、共振振巾の大きさについては、これまでとは逆に、加振力レベルの増加とともに共振振巾が減少する傾向にある。また、近接して現われるピークの近傍の形状が加振力レベルによって変化し、とくに E-EW 成分でレベルの増加とともに2つのピークにはっきり分化していく傾向のみられることが特徴的である。

#### 3° 連続する加振過程の繰返しの影響

Fig. 20 に示すように、数日間にわたる加振の休止期間のち、初回の加振において UP と DOWN の応答が描くヒステリシスはかなり大きい。しかし、一回の UP の加振過程によって応答特性は安定し、続く DOWN の加振およびそれ以降の加振の繰返しではほぼ一定した応答曲線が得られる。1° で述べたように引続く2回目以降の加振過程におけるヒステリシスは F1 基礎の場合非常に小さい。

その後加振を停止し、適当な休止期間をおくと、非可逆性の状態変化が残存する部分を除いて、地盤の動特性はほぼもとの状態に回復し、新たな加振過程に対して Fig. 20 に示すような応答曲線の遷移状態を再現する。非可逆性の状態変化の大きさは、基礎に対する加振力のレベルすなわち系の応答レベルが非線形領域への程度入るかによって定まり、これが“加振の繰返しの影響”の項で述べた地盤の動特性の変化すなわち地盤復元力の劣化を惹起する。

#### 4° 水平2方向の実験結果の比較

水平 NS 加振に対する応答曲線の一般形を Fig. 21 に示した。Fig. 18 と比較すれば、EW 加振の結果とすべて共通する性質がこの NS 加振の場合にも見出される。直角2方向の加振による応答曲線の形状自身が定性的にはほぼ完全に一致し、応答量そのものの大きさにやや差異がみられる程度にすぎないからである。水平加振に対する直交する2方向の地盤の動特性はほぼ同一の性質をもち、他方向の繰返し加振履歴の影響はあま

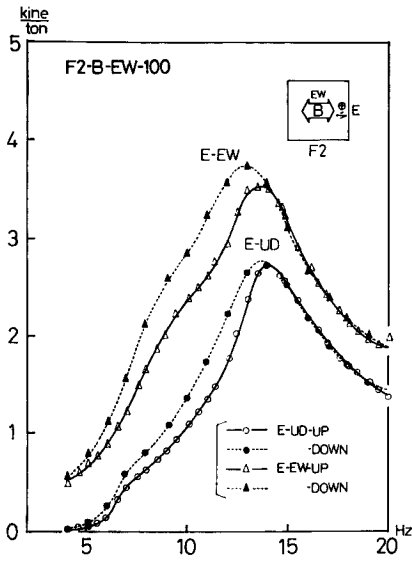


Fig. 22

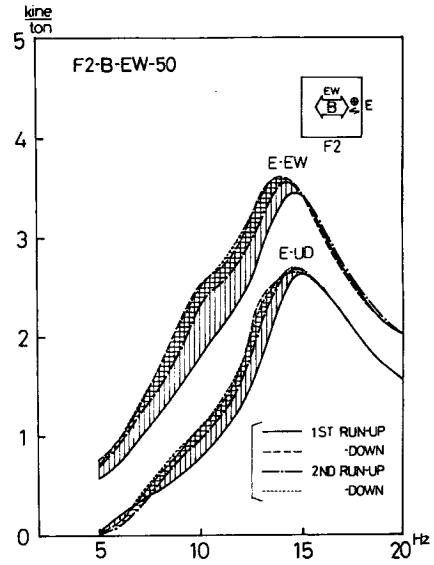


Fig. 24

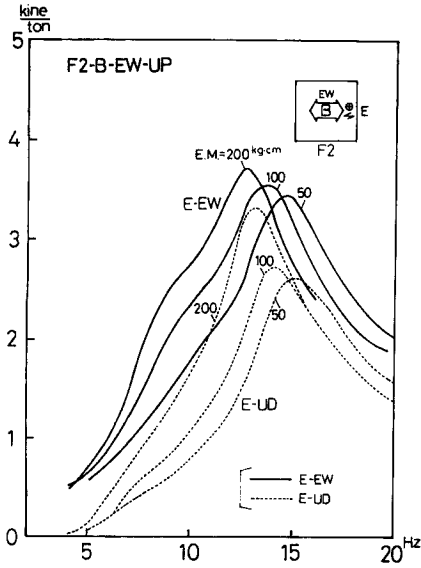


Fig. 23

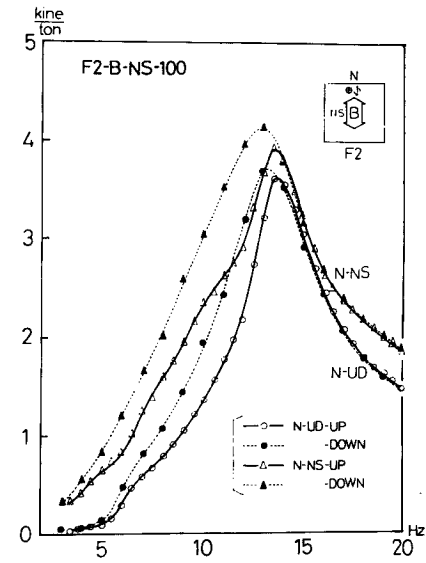


Fig. 25

Velocity response curves of F2-foundation for the case of horizontal excitation.

り受けないことがわかる。

### 3.5 水平加振実験（F2 基礎）

#### 1° 応答曲線の一般形

水平 EW 加振の場合の速度応答曲線の一般形を Fig. 22 に示した。寸法・自重の大きい F1 基礎の場合と比較すると、次のような相当異なる性質が認められる。すなわち、まず応答曲線には唯一の明瞭なピークが存在する。応答の水平成分と上下成分は共振振動数を共有し、両者の応答曲線は類似の形状をもっている。なお以下に述べる諸性質についても、水平・上下の2つの応答成分の間には共通する性状を認めることができる。次に UP と DOWN の応答曲線が描くヒステリシスは本実験の中でも既往の実験結果に共通する最も典型的な関係を示し、しかも系の応答レベルが大きいので、両者の描くヒステリシスは非常に大きい。

#### 2° 加振力レベルの影響

水平 EW 加振に対して偏心モーメントによる速度応答曲線の変化を Fig. 23 に示した。加振レベルすなわち系の応答レベルの増加は、共振振動数を顕著に低下させ、同時に単位加振力当りの共振振幅を漸減させながら、応答曲線が全体として低振動数域へ移行するという、従来の実験結果に共通する性質が明瞭にかつ典型的に現われている。さらに応答曲線の骨格曲線が左に傾斜しており、underlinear な非線形性が本実験の中で全体に最も典型的な形で認められる。

#### 3° 連続する加振過程の繰返しの影響

水平 EW 加振に対して、UP および DOWN の加振過程を連続的に繰返した場合の速度応答曲線を Fig. 24 に示した。この繰返しの影響についても各応答曲線間の関係は従来の実験結果に共通する典型的な性質を示している。1° で述べたように、UP と DOWN の応答曲線は共振点より低振動数側において顕著なヒステリシスを描くが、初回と2回目以降とは応答曲線の経路およびヒステリシスの大きさが異なる。すなわち、共振点より左側の領域で、2回目以降の UP が大中に左側へ移行し応答量が大きくなるのに対して、DOWN の過程および共振点の右側の領域では両者の曲線がほとんど変わらない。初回の UP の加振過程を終えると応答特性は安定し、2回目以降の繰返しでは 2nd RUN で示される一定した応答曲線を描くようになる。また、2回目以降でヒステリシスの大きさが激減するが、F1 基礎の場合とは異なり、系の応答レベルが大きく非弾性的な性質の現われ方が強いので、安定状態に達したのちもなお、応答曲線は共振点より低振動数側で比較的大きなヒステリシスを描く。

#### 4° 水平2方向の実験結果の比較

水平 NS 加振に対する応答曲線の一般形を Fig. 25 に示した。F1 基礎の場合と同様に、直角2方向の水平加振の結果はともに類似の性質をもっている。応答曲線の形状は酷似し、共振振動数はほぼ完全に一致しており、応答量そのものの大きさに差異がみられるにすぎない。とくに目立った相異といえば、EW 加振で上下成分の応答量が小さく、基礎の回転変形の量が NS 加振の場合に比べて少ないことである。

## 4. 実験結果の考察

筆者等が実施した既往の振動実験の結果<sup>1)2)</sup>を参照し、前節で述べた今回の振動実験の結果を集約すると、以下のような考察をまとめることができる。

#### 1° 地盤の動特性の非弾性的なあるいはレオロジカルな性質について

基礎の応答特性の上に現われる地盤の動特性の非弾性的なあるいはレオロジカルな性質は次の3点に集約することができる。

- ① 地盤復元力の underlinear な非線形特性
- ② 応答曲線にみられる履歴現象
- ③ 地盤復元力の回復性

これらの諸性質は一般に、④加振力のレベルが大きく基礎あるいは地盤の応答レベルが大きいほど、⑤基礎

の寸法・自重が小さく基礎に接する周辺の土に対する拘束圧力が小さいほど、また、◎所謂軟弱な地盤ほど、強く現われる。これらの諸性質の詳細は以下の各項に述べる。

## 2° 地盤復元力の underlinear な非線形特性について

起振機の偏心モーメントの設定値すなわち加振力のレベルが大きくなると、いかえると連成系の応答レベルが増加すると、一般に応答曲線の共振振動数が低下するとともに単位加振力当りの共振振巾が漸増し、応答曲線が全体に左へ移行する。さらに応答曲線はその骨格曲線が左に傾くという性質をもっている。このことは応答の増大とともに復元力の大きさが弾性時より低減していくという所謂 soft 型のあるいは underlinear な非線形特性が地盤の動特性に存在することを意味する。逆に加振力のレベルを下げていくと、応答曲線の性状が上記の移行とは逆の方向に向かうが、加振力のレベルを下げる前のもとの状態へ完全にはもどらない。なお、応答波形に加振振動数の2ないし3倍の倍数調波の混入が認められる場合があり、これも underlinear な非線形特性のひとつの現われと解釈することができる。

## 3° 応答曲線にみられる履歴現象について

加振振動数を増加させながら測定する“UP”の加振過程と逆に減少させながら測定する“DOWN”の加振過程で、応答曲線は一致せず履歴（ヒステリシス）を描く。これらは一般に共振点を境にして性質を異にし、その右側の高振動数域でUP・DOWNがほぼ完全に一致するのに対して、左側の低振動数域ではDOWNの応答はUPより常に大きくDOWNの曲線は必ずUPの上を通るという特徴をもっている。このことは underlinear な非線形系の強制振動のさいに現われる jump 現象のような特性を発生する機構が地盤の動特性に存在することを意味する。こうした傾向は上下加振よりも水平加振の場合により典型的に現われる。

連続するUP・DOWNの加振過程の繰返しによってこの履歴はある大きさに収束し、応答曲線は安定したループを描くようになる。一般に最初のUPの加振過程を終えるときは安定状態に達すると見なしてよい。加振過程の繰返しによって応答曲線は初回のUPのみが2回目以降で左側に移行し、その結果2回目以降のループは顕著に小さくなる。最初の履歴の大きさはそのUPの加振過程における最大応答のレベルが支配する。

## 4° 地盤復元力の回復性について

地盤の動特性には、“静的安定状態”と連成系の最大応答レベルによって異なる“動的安定状態”と名付けうる2種の平衡状態の存在が考えられる。Fig. 26に模式的に示すように、加振前に静的安定状態にある地盤は連続する加振過程の繰返しによって動的安定状態へ次第に遷移する。共振点をこえる初回のUPの加振過程を終えるときはほぼこの状態に近接してしまい、応答曲線はUPとDOWNで安定したヒステリシス・ループを描く。〔これを状態が遷移する現象なので“遷移過程”あるいは地盤復元力の劣化を意味する現象なので“劣化過程”と名付けよう〕一方、加振を停止し適当な休止期間を設けると、動的安定状態から静的安定状態への回復現象が進行する。半日ないし1日程度の回復量は少ないが、1週間ないし10日程度の休止ではほぼ完全に回復

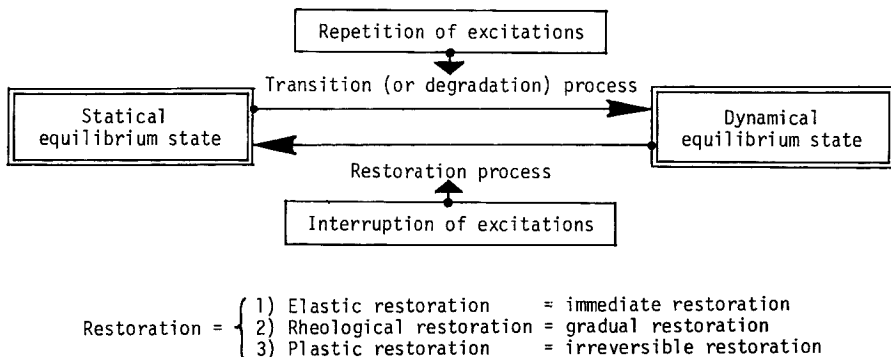


Fig. 26 Schematic diagram representing the recovery of ground characteristics.



する。基礎周辺の土に急激な含水量の増加が生じると、地盤復元力にやや劣化現象がみられるが、同時にこの回復現象が短時間に生じ、しかも大半の部分が回復する。〔これを状態が元に戻るレオロジカルな現象なので“回復過程”あるいは“復元過程”と名付けよう〕連成系の応答レベルが大きくやや強い非線形の領域に入ると、非可逆性の状態変化——一般に地盤の動特性における剛性の低下と減衰性能の増加という地盤復元力の劣化とし現われる——の残存が目立つようになり、もとの状態への完全な回復が妨げられ、応答特性の再現性が失われる。

##### 5° 諸性質の発生原因について

以上の各項にまとめた地盤の動特性の非弾性的なあるいはレオロジカルな諸性質に関与する地盤の領域は、いちおう空間的な拡がりをもった基礎周辺地盤と考えることができるが、そのなかでも基礎に接する周辺の土が貢献している度合いが大きく、この部分の土の性質ないし状態の局所的な影響が強いと判断される。すなわち、基礎周辺の土の媒質としての応力—歪関係における非弾性的なあるいはレオロジカルな挙動、および、基礎と土との接触状態の変化、という2つの原因が互いに関連しあいながら上記の諸特性を発生させると推論できる。

現象論的な見方をすれば、基礎と土との接触状態の変化の一部は基礎下の圧力分布あるいは接触面積の変化として、また媒質としての非弾性的な挙動の一部は *underlinear* な履歴を描く土の応力—歪関係として、さらに媒質としてのレオロジカルな挙動の一部は変化した後の土の性質ないし状態が復元 (*restoration*) していく現象として、それぞれ把えることができそうである。そして、直観的な表現をとると、Fig. 26 に示すように後者の回復現象には、復元が直ちに現われる弾性に近い性質をもつ部分、復元に時間を要する *thixotropy* のような性質をもつ部分があり、さらに復元のきわめて遅いあるいは回復不能の非可逆的な性質をもつ部分が存在するのではなかろうか。

上述のような推論に立つと、静的安定状態から動的安定状態へ進行する現象は外力の作用による状態変化の“遷移過程”，また逆方向への回復現象は回復に要する遅延時間に分布をもったその“復元過程”とみることができる。したがって、静的安定状態とは、復元過程の完了した状態、また動的安定状態とは両過程の平衡状態であるといえよう。

応答曲線が履歴を描く現象において、共振点の左側でのみ *DOWN* の経路が必ず *UP* の上を通るという性質には、*soft* 型の *jump* 現象を生起させる非線形の機構に、弾塑性の履歴特性を地盤復元力に発生させたり、状態変化の遷移過程と復元過程を生じるような他の機構などが複合して、実現象の場合にこのような現われをとるのではないかと考えられる。

##### 6° 歪レベルのオーダーについて

振動実験中に基礎に接する土に生じる最大の垂直または剪断応力とこれに対応する歪レベルのオーダーを推定してみると **Table 3** のようになる。ここに、応力の推定には共振点における加振力と慣性力の応答値をとり、両者の位相差が  $\pi/2$  になるとして下式によった。

$$\text{最大応力} = \frac{[\max|\text{加振力}|^2 + \max|\text{慣性力}|^2]^{\frac{1}{2}}}{\text{基礎面積}} \times (\text{土圧測定値との比較から定めた倍率})$$

右辺の倍率によって最大値の平均値からの偏差を表現する。また歪の推定には、**2.2** で述べた地盤調査から得られている表層の常数

$$\begin{aligned} \text{密度} & \quad \rho = 1.53 \text{ ton/m}^3 \\ \text{横波速度} & \quad c_p = 900 \text{ m/sec} \\ \text{縦波速度} & \quad c_s = 100 \text{ m/sec} \end{aligned}$$

を使用し、上に求めた応力の推定値に基いて、弾性範囲内で成立する関係から歪量を算定した。非線形領域に入ると剛性が低下するので歪量はやや増加するし、基礎底面内でも局所的にはかなりの変動があると予測されるが、Table 3 によれば平均的には非常に強い非線形の領域には達していないと考えられる。

Table 3 Presumed maximum stress and strain of soil underneath the foundation.

| 基礎の種類 | 加振方向 |   | 応力の推定値 |                         | 歪の推定値                |
|-------|------|---|--------|-------------------------|----------------------|
|       |      |   | 種類     | 値                       |                      |
| F1    | 上    | 下 | 垂直応力   | 0.05 kg/cm <sup>2</sup> | 1.1×10 <sup>-4</sup> |
| 〃     | 水    | 平 | 剪断応力   | 0.013 〃                 | 8.1×10 <sup>-5</sup> |
| F2    | 上    | 下 | 垂直応力   | 0.10 〃                  | 2.1×10 <sup>-4</sup> |
| 〃     | 水    | 平 | 剪断応力   | 0.11 〃                  | 6.9×10 <sup>-4</sup> |

### 7° 地盤の軟弱性について

所謂軟弱な地盤ほど、2°~4°の項に述べた地盤の動特性の非弾性的なあるいはレオロジカルな諸性質が、同一条件のもとで一般に顕著に現われる。したがって、このような諸性質の出現の程度を地盤の“軟弱性”を表わすひとつの指標として設定することができよう。また、含水量の増加による地盤の軟弱化は、地盤復元力における剛性の低下と周辺地盤の非線形度の進行に伴う減衰性能の増加とみることができる。

### 8° 土圧応答の特徴と変位応答との関連について

基礎に接する表層の土は粘土質であるにもかかわらず、基礎下に生じる静圧の分布は従来実験室内で砂質土について得られている放物線形に近い。基礎に接する土への自重による拘束力が強い中央部付近の土圧応答は、振動数への依存性も小さく、加振力レベルの変化による影響もあまり受けなくて安定した応答特性を示す。一方、拘束力の弱い端部近くになると、力系統の局所的な尺度である動土圧応答と変位系統の平均的な尺度である基礎自身の速度応答との間に共通する傾向が見られるようになる。また、基礎端部に近くになるほど加振力レベルの影響を強く受け、土と基礎との接触状態の変化が直接的に土圧応答に影響を与えるので、強い非弾性的な性質が現われるとともに、再現性が失われ、回復の妨げられる部分——非可逆性の状態変化——が多くなる。

### 9° その他の特徴について

**基礎の振動モード：**基礎寸法が大きくなると版としての剛性が低下し、剛体的な変形に加えて、主として地盤反力の不均質性から生起する版的な変形が問題になる。また、同じく地盤反力の不均質性と現実の系には避け難い非対称性によって、加振方向に応じて通常考慮の必要がないと予想される振動型の影響が無視できなくなる。こうして基礎寸法の増加によって振動型が複雑化するとともに、基礎の応答はさらに深い位置の地層構造の影響を受け、複数个の固有振動が通常対象とする振動数の領域に現われるようになって、一般に応答曲線の形状が複雑になる。

**直交する水平2方向の振動特性：**基礎自身の速度応答というマクロな尺度でみるかぎり、直交する2方向の水平加振の結果は全般的にきわめてよく似た振動特性を示す。両者は共振振動数を共有し、応答曲線の形状や各種パラメータの影響など定性的な傾向はほぼ完全に一致し、応答量の大きさそのものにやや差異がみられるにすぎない。また一方の加振履歴は他方向の振動特性にほとんど影響を与えない。

## 5. 波動論による検討

### 5.1 解析の目的

本節では、3次元粘弾性波動論に基づいて筆者等が導いた Dynamical Ground Compliance の理論<sup>9)</sup>を実験対象に適用し、実験結果と対比させながら、この理論の妥当性と適用限界に関して若干の検討を行なう。弾性論に立脚しているから非弾性的なあるいはレオロジカルな諸性質の立入った説明は無理であるので、ここでは応答特性の全体的な傾向をどの程度説明できるかという概括的な検討にとどめる。また直接的な適用に明らかに限界がある場合には、現実の振動機構を推定しながら、等価線形化のような意味での理論の修正を試みる。なお既に2.2で述べたように、実験を実施した地点の地盤調査がまだ完了していないので、敷地の周辺で得られている地盤調査の結果を地盤モデル構成の資料として用いる。したがって、地層構成や地盤常数に不確定要

素が残るため、本格的な定量的比較はまだ困難と判断し、主として定性的議論にとどめておく。

**5.2 波動論による解析法の概要**

水平な境界面をもち任意の数の線形粘弾性体の層から構成される多層地盤上の質量のない剛体長方形基礎に、上下・水平あるいは回転方向の正弦加振力が作用するとき、加振力と基礎変位の力-変位の無次元複素伝達関数を“長方形基礎の Dynamical Ground Compliance”と定義する。time factor  $e^{i\omega t}$  を略してその一般的な表現式を示すと

$$\begin{bmatrix} w_B \\ u_B \\ \phi_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_V G_V & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_H G_H & \alpha_{HR} G_{HR} \\ 0 & \alpha_{HR} G_{HR} & \alpha_R G_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_V \\ P_H \\ P_R \end{bmatrix} \quad \text{i.e., } \mathbf{W}_B = \mathbf{G}\mathbf{P} \dots\dots\dots(1)$$

ここに

$$G_i = f_{11} + i f_{21} \quad [i = V, H, R, HR] \quad ; \text{ Dynamical Ground Compliance} \dots\dots\dots(2)$$

$$\alpha_V = \alpha_H = \frac{1}{b\bar{\mu}}, \quad \alpha_{HR} = \frac{1}{b^2\bar{\mu}}, \quad \alpha_R = \frac{1}{b^3\bar{\mu}} \dots\dots\dots(3)$$

また、 $P_V, P_H, P_R$ ; 上下、水平および回転方向の加振力の振巾、 $w_B, u_B, \phi$ ; 加振方向に対応する基礎底面の上下、水平および回転変位、 $b$ ; 基礎の半巾、 $\bar{\mu}$ ; 地盤の剪断弾性係数の基準量、 $\omega$ ; 加振振動数、 $t$ ; 時間、である。

$G_i$  は一般に特異点を含む複素 2 重積分で表わされ、加振振動数、基礎の形状・寸法、地層構成と地盤常数の関数となる。この解の誘導にさいして、基礎下に生じる圧力分布を一般形に仮定し、これに伴なって地表面に生じる基礎底面位置の変位から、剛体基礎としての変位を算定する方法をいくつか想定しているが、ここでは上下および水平加振で一様な鉛直または剪断応力を、回転加振で回転軸からの距離に比例する三角形の鉛直応力の分布をそれぞれ仮定し、基礎底面全体にわたってとった地表面変位の単純平均で基礎応答を評価する方法をとった。他の応力分布および応答評価法による影響は定性的には小さいことが確かめられている。

さて Dynamical Ground Compliance の理論に基づいて、多層粘弾性地盤上の長方形基礎に正弦加振力が直接作用する場合の応答特性を表わす解の表現を求めよう。断面  $2b \times 2c$  の剛体基礎に上下、水平および回転方向の正弦加振力が作用するとき、運動方程式は  $e^{i\omega t}$  を略すると次式で表わされる。

$$-\omega^2 \begin{bmatrix} M_0 & 0 & 0 \\ 0 & M_0 & 0 \\ 0 & 0 & I_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_0 \\ u_0 \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -l_0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_V \\ P_H \\ P_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & h & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_V \\ F_H \\ F_R \end{bmatrix} \dots\dots\dots(4a)$$

$$\text{i.e., } -\omega^2 \mathbf{M}\mathbf{W}_0 + (\mathbf{S}^{-1})^T \mathbf{P} = \mathbf{C}\mathbf{F} \dots\dots\dots(4b)$$

あるいはこれを書き変えて

$$-\omega^2 \mathbf{S}^T \mathbf{M}\mathbf{S}\mathbf{W}_B + \mathbf{P} = \mathbf{S}^T \mathbf{C}\mathbf{F} \dots\dots\dots(5)$$

ここに

$$\mathbf{W}_0 = \mathbf{S}\mathbf{W}_B, \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & l_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(6)$$

また、 $M_0, I_0$ ; 基礎の質量および重心軸まわりの慣性モーメント、 $w_0, u_0, \phi$ ; 基礎重心の上下、水平および重心まわりの回転変位、 $P_V, P_H, P_R$ ; 地盤から基礎に働く上下、水平および回転方向の復元力、 $F_V, F_H, F_R$ ; 基礎に作用する上下、水平および回転方向の正弦加振力、 $l, h$ ; 基礎底面から基礎重心までの高さおよび基礎重心から水平加振力の作用高さ、である。

(4)(5) に (1)(6) の関係を代入し、解を求めれば

$$\mathbf{W}_0 = [-\omega^2 \mathbf{M} + (\mathbf{S}^{-1})^T \mathbf{G}^{-1} \mathbf{S}^{-1}]^{-1} \mathbf{C}\mathbf{F} \dots\dots\dots(7)$$

$$\mathbf{W}_B = [-\omega^2 \mathbf{S}^T \mathbf{M}\mathbf{S} + \mathbf{G}^{-1}]^{-1} \mathbf{S}^T \mathbf{C}\mathbf{F} \dots\dots\dots(8)$$

(7) または (8) から、基礎の各位置における“単位加振力当りの速度応答”を無次元表示の式を基にして求

めると、次のように与えられる。

[1] 上下加振の場合

● 重心および底面の上下速度  $\dot{w}_B = \dot{w}_0 = \frac{ia_0}{G_V - a_0^2 m_0} \cdot k_V \dots\dots\dots(9)$

[2] 水平加振の場合

● 重心の水平速度  $\dot{u}_0 = ia_0 \frac{G}{D} \left[ G_\beta + \frac{h}{b} G_2 \right] \cdot k_H \dots\dots\dots(10)$

● 回転角速度  $l_0 \dot{\phi} = ia_0 \frac{G}{D} \cdot \frac{l_0}{b} \left[ G_2 + \frac{h}{b} G_m \right] \cdot k_H \dots\dots\dots(11)$

● 底面の水平速度  $\dot{u}_B = \dot{u}_0 - l_0 \dot{\phi} \dots\dots\dots(12)$

● 上面端部の水平速度  $\dot{u}_T = \dot{u}_B + (l_0 \dot{\phi}) \frac{l_T}{l_0} \dots\dots\dots(13)$

● 上面端部の上下速度  $\dot{w}_T = (l_0 \dot{\phi}) \left( \frac{l_0}{b} \right)^{-1} \dots\dots\dots(14)$

ここに

$$\begin{cases} D = G_m G_\beta - (G_2)^2, & G_m = G_R - a_0^2 m_0 G, & G_\beta = G_1 - a_0^2 \beta_0 G \\ G = G_H G_R - (G_{HR})^2, & G_1 = G_H + 2 \frac{l_0}{b} G_{HR} + \left( \frac{l_0}{b} \right)^2 G_R, & G_2 = G_{HR} + \frac{l_0}{b} G_R \end{cases} \dots\dots\dots(15)$$

$$\begin{cases} a_0 = \frac{\omega}{\bar{c}_s} b; \text{ 振動数無次元量, } m_0 = \frac{M_0}{\bar{\rho} b^3}; \text{ 質量比, } \beta_0 = \frac{I_0}{\bar{\rho} b^5}; \text{ 慣性モーメント比} \\ k_l = \frac{F_l}{\beta^2 \bar{\rho} \bar{c}_s} \quad [l = V, H]; \text{ 無次元式を有次元化するための係数} \end{cases} \dots\dots\dots(16)$$

また、 $\bar{\rho} = \bar{c}_s \sqrt{\mu/\bar{\rho}}$ ; 地盤の密度および横波速度の基準量、 $l_T$ ; 基礎の高さ、 $\cdot = \partial/\partial t$ , である。

5.3 パラメータの設定

計算に必要なパラメータを実験の条件に対応させて次のように定めた。

1° 地盤に関するもの

● 地層構成: 実験地点での地層構成がまだわかっていないので、基礎の寸法と Fig. 2 に示した敷地付近の柱状図と地盤常数・波動伝播速度の分布から判断して、概括的に半無限地盤と設定した。

● 地盤常数と波動伝播速度: 表層での値を採用し、これを必要な各基準量に設定した。すなわち

- 密度  $\bar{\rho} = 1.53 \text{ ton/m}^3$
- 横波速度  $\bar{c}_s = 100 \text{ m/sec}$
- 縦波速度  $\bar{c}_p = 900 \text{ m/sec}$
- ポアソン比  $\nu = 0.49375$

● 地盤の内部減衰: 地盤調査の結果にこれを推定するだけの資料が得られていないので、ここでは、①媒体は Voigt solid からなる、②横波と縦波に関する粘性係数が等しい、という仮定をおき、内部減衰作用の小さい場合の特性を明らかにするねらいから、粘性係数の無次元量を次のように *a priori* に与えることにした。

$$\eta = \eta_s = \eta_p = 0.1$$

ここに

$$\eta_s = \frac{\bar{c}_s}{b} \cdot \frac{\mu'}{\mu}, \quad \eta_p = \frac{\bar{c}_s}{b} \cdot \frac{\lambda' + 2\mu'}{\lambda + 2\mu} \dots\dots\dots(17)$$

また、 $\lambda, \mu$ ; 地盤の Lamé の常数、 $\lambda', \mu'$ ;  $\lambda, \mu$  に関する粘性常数である。

2° 基礎 (起振機を含む) に関するもの

- 基礎寸法:  $b = c = 2 \text{ m}$  [F1],  $1 \text{ m}$  [F2]  
 $l_T = 0.7 \text{ m}$  [F1],  $0.35 \text{ m}$  [F2]

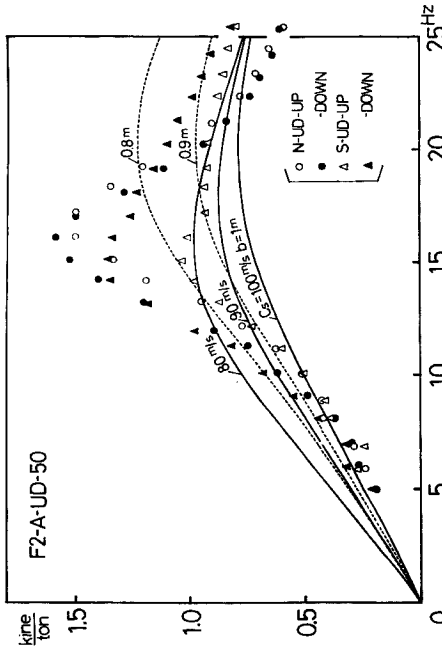


Fig. 27 F1-foundation, vertical excitation.

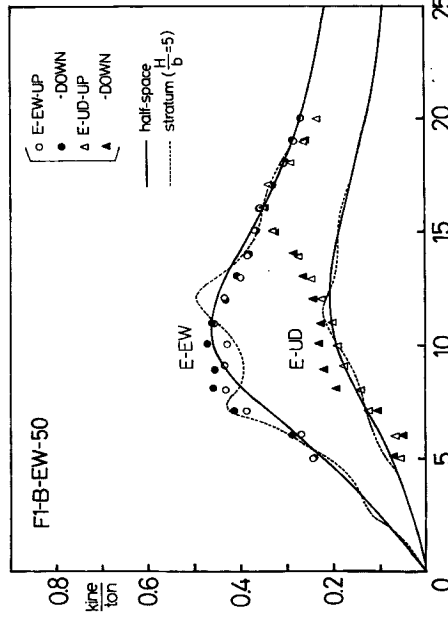


Fig. 28 F1-foundation, horizontal excitation.

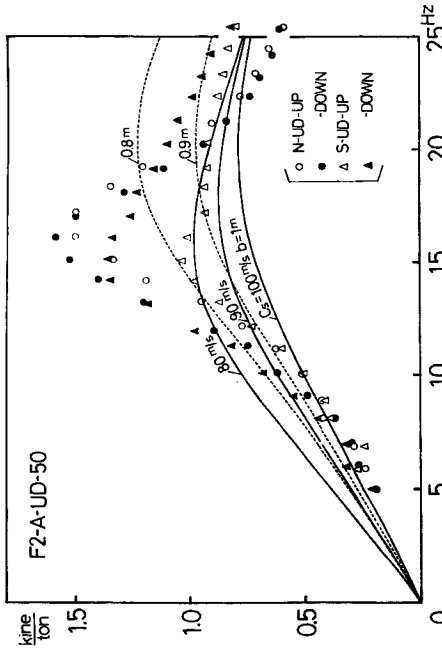


Fig. 29 F2-foundation, vertical excitation.

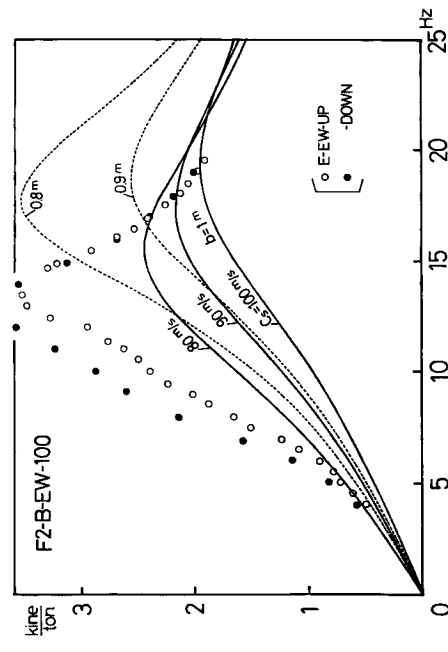


Fig. 30 F2-foundation, horizontal excitation.

Comparison of theoretical and experimental velocity response curves.

- 重心高さ： $l_0=0.37$  m [F1], 0.26 m [F2]
- 重心より水平加振力の作用高さ： $h=0.47$  m [F1], 0.23 m [F2]
- 基礎自重： $M_0=27.88$  ton [F1-上下], 4.36 ton [F2-上下]  
27.63 ton [F1-水平], 4.11 ton [F2-水平]
- 基礎慣性モーメント： $I_0=37.33$  ton $\cdot$ m<sup>2</sup>[F1], 1.41 ton $\cdot$ m<sup>2</sup> [F2]

#### 5.4 理論値と実験値との比較

5.3 で設定したパラメータの値に基づいて、5.2 で導いた基礎の応答特性を表わす一般解から計算した理論値を、対応する実験値とともに Fig. 27 [F1 基礎—上下加振]、Fig. 28 [F1 基礎—水平加振]、Fig. 29 [F2 基礎—上下加振] および Fig. 30 [F2 基礎—水平加振] に示した。

理論値と実験値の比較に関して全体を通じて共通した特徴は

1. 理論による計算結果は実験値の応答振巾の全般的な大きさをオーダーとしてはよく説明していると考えてよいが、詳細にみると、共振振動数の位置についてもまた振動数に関する応答振巾の変動についても両者の間に偏りがみられる。

2. 理論値において逸散減衰の効果を過大に評価しており、とくに寸法が小さく応答レベルの大きい F2 基礎の場合にこの傾向が著しい。なお、内部減衰の効果は完全弾性地盤の場合に比較して小さいことを理論計算において確かめている。

このような特徴を生じる原因として次の3点をあげることができる。

1. 地盤モデルの構成の項で既に述べたように、層構造と地盤常数の設定に不確定要素を含むこと。また、通常の地盤調査の結果には理論計算にとって無視できない程度の誤差を含むこと。

2. 地盤調査の結果は土の微小歪レベルに対するもので、いわば弾性領域の地盤常数が得られたことになるが、応答レベルの増加によって、非線形化に伴う地盤復元力の劣化が生じ地盤常数が変化すること。

3. 土と基礎との接触状態の変化によっても地盤復元力の劣化が生じること。

以上3つの原因を弾性論の範囲内において考慮しよう、次のような理論値の修正を行なってみた。その計算結果を Figs. 27~30 に併わせ示した。

1. **波動伝播速度の修正**：上記の原因1と2に対応するもので、ここでは簡単のためポアソン比を一定に保ち、横波と縦波の伝播速度を比例させながら減少（地盤復元力の劣化に対応）または増加（深い地層構造の影響に対応）させ、結果を各図の実線で示した。伝播速度の低下は共振振動数の減少と応答振巾の増大を生じ、逸散減衰の効果を小さくすることがわかる。とくに共振振動数を変動させる効果が大きい。

2. **接触面積の修正**：上記の原因3（場合によっては2）に対応するものである。これを等価的に基礎と土との接触面全体が有効には作用していないとして表現し、基礎底面の2辺を同じ割合で減少させ、結果を各図に点線で示した。接触面積の減少は地盤復元力の劣化を等価的に意味し、共振振動数をやや減じるとともに応答振巾を増大させ、逸散減衰の効果を小さくすることがわかる。とくに応答振巾を変動させる効果、逸散減衰の影響を変動させる効果が著しい。

3. **層構造の考慮**：上記の原因1に対応するものである。層構造の存在は地盤の固有振動を惹起し、とくに地表面付近の層構造は共振振動数の位置および応答振巾や逸散減衰の効果のすべてに相当大きな影響を与える<sup>4)</sup>。なお、F1 基礎—水平加振の場合に地表面より10 mの位置に剛な基礎を設定したケースを Fig. 28 に点線で示した。

以上の解析を総合すると、本節の最初に述べた全般的な2つの特徴に加えて、主要な結果を以下のようにまとめることができる。

1. 粘弾性理論に立脚するとき、上下加振と水平加振の結果を一般に同一のモデルで説明することは困難であり、理論値の等価な修正においても異なったモデル化が要求される。このことは、連成系の応答レベルに差がないにもかかわらず、基礎と土との接触状態の変動が2つの加振方向で異なることを意味すると考えられる。

2. ここではデータ不足で具体的に示すことはできなかったが、波動伝播速度および基礎と土との接触面積の低減という理論値の等価な修正結果から判断すれば、連成系の応答レベルに応じてこの2つの量を変動させる修正法は、系の主要な共振振動数の位置や逸散減衰の効果、応答振巾の大きさなど、underlinear な非線形性をも含めて、応答特性の性質を説明しうる可能性をもっていることが指摘できよう。

3. F2 基礎の場合 (Figs. 29, 30), 上記 2 で述べたような修正を行ってもなお逸散減衰の過大評価は補正しきれないが、ごく浅い位置にその存在が推定されるやや硬い砂層を考慮すると、逸散減衰の効果が小さくなり、実験値の傾向をかなり説明できるような結果が得られる。その一例は(その2)の Figs. 12, 13 に示されているので参照されたい。

4. Fig. 28 に示すように、F1 基礎の水平加振の場合に現われる水平成分の隣接したピークは、比較的深い位置にある硬い地層の存在によっても生起することがわかる。層構造の固有振動と連成系の固有振動の組合せとして現われてくるのである。

5. 総括的に述べれば、起振機試験による基礎構造の振動特性に影響を与える主要な要因として、④地盤の動特性の非線形化の程度、⑤基礎と土との接触状態の変動、③とくに地表面付近の層構造の存在、をあげることができる。

## 6. む す び

実在地盤の動特性に関する一連の実験的研究の一環として、大阪地方の典型的な軟弱地盤上に大小2個の基礎構造モデルを設置し、起振機による加振実験を実施して、基礎自身の速度応答および基礎下に生じる土圧応答分布を計測した。実験結果の分析から

『基礎構造の振動特性として現われる地盤の動特性の非弾性的なあるいはレオロジカルな諸性質は、④地盤復元力の underlinear な非線形特性、⑥応答曲線にみられる履歴現象、③地盤復元力の回復性、という3点に集約できること』

を示し、これらの諸性質を詳細に分析するとともに、その発生原因について考察を加えた。また、

『上記のような諸性質の出現の程度を、地盤の所謂“軟弱性”を表わすひとつの指標として設定できること』を指摘した。さらに粘弾性波動論から導いた Dynamical Ground Compliance の理論に基づいて、実験結果の検証と解釈を試み、この理論の妥当性と適用限界に関して若干の考察を行なった。そして、実際の振動機構に対応づけながら理論値の等価な修正を試みた。その結果、

『Dynamical Ground Compliance の理論を直接適用して実験結果を説明するのは一般に妥当性を欠く場合が多いが、系の応答レベルに応じて波動伝播速度と接触面積を低減することは、この理論の等価な修正として有効な方法になりうること』

を示すとともに

『基礎構造の振動特性の理論による予測を行なう場合大きな影響を与える要因として、④地盤の動特性の非線形化の程度、⑤基礎と土との接触状態の変動、③とくに地表面付近の層構造の存在、をあげること』を指摘した。

本報では、実験敷地の地盤調査が不備なため地盤モデルの構成のさいに不確定要素が多く、とくに理論面からの検討が十分には行なえていないが、引続き同一敷地での詳細な地盤調査と振動実験を計画しているので、地盤の動特性に非弾性的なあるいはレオロジカルな諸性質が発生する原因からさらに立入ってその機構にまで考察を進めるとともに、適切な地盤モデルを構成し、理論による実験結果の検証と予測を行なうこと、を今後の研究課題としたい。

## 謝 辞

本振動実験の機会を与えられた日本建築総合試験所、日本住宅公団および新日本製鉄(株)、基礎構造モデルと

実験現場の設営をおねがひしたフジタ工業(株)、起振機を借用した埼玉大学土木工学教室の各関係者の方々、ならびに実験の実施とデータ整理に勞をわずらわせた研究室の文部技官市川信夫氏と工学部建築学教室の大学院生嶋谷和彦氏、に深く感謝の意を表します。最後に、理論による数値計算には京都大学大型計算機センターの“FACOM 230-60” および京都大学計算センターの“KDC-II(HITAC 5020)”を使用したことを付記する。

#### 参 考 文 献

- 1) 小堀鐸二・南井良一郎・鈴木 有：基礎の振動に及ぼす地層構造の影響について——実地盤モデルによる検討——，日本建築学会近畿支部研究報告集<構造I>，昭47.6，pp. 5-8.
- 2) 小堀鐸二・南井良一郎・鈴木 有：基礎版の振動に現われる地盤特性の非弾性的な性質について，日本建築学会大会学術講演梗概集<構造系>，昭47.10，pp. 487-488.
- 3) Kobori, T., R. Minai and T. Suzuki: Foundation Vibrations on a Viscoelastic Multi-Layered Medium, Proceedings of the 3rd Japan Earthquake Engineering Symposium-1970, Nov. 1970, pp. 493-500.
- 4) 小堀鐸二・南井良一郎・鈴木 有：基礎の振動に及ぼす地層構造の影響について，日本建築学会大会学術講演梗概集<構造系>，昭46.11，pp. 693-694.